

В.Д. Калугин¹, В.В. Тютюник¹, Л.Ф. Черногор², Р.И. Шевченко¹

(¹Национальный университет гражданской защиты Украины,

²Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина; e-mail: post@nuczu.edu.ua)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТЕХНОГЕННОЙ ОПАСНОСТИ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННО-СОЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Разработан подход к оценке техногенной опасности природно-техногенно-социальной системы (ПТС системы) на основе анализа её интегрального показателя – энергии техногенного происхождения, которая является суммой электроэнергии и энергий всех видов топлив, потребляемых в процессе функционирования ПТС системы.

Ключевые слова: техногенная опасность, чрезвычайная ситуация, энергетический подход, безопасность жизнедеятельности.

V.D. Kalugin, V.V. Tiutiunik, L.F. Chernogor, R.I. Shevchenko

ENERGY APPROACH TO ASSESS TECHNOLOGICAL HAZARDS OF NATURAL AND INDUSTRIAL-SOCIAL SYSTEM

Approach for the assessment of technogenic hazards of natural and technologically-social system (PTS system) based on the analysis of its integrated indicator – energy technogenic origin, which is the sum of electric power and energy of all fuels consumed in the operation of the TCP system, is developed.

Key words: man-made hazards, emergency, energy approach, life safety.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 4 октября 2013 г.

Целью данной статьи является развитие представлений о динамике и энергетике функционирования ПТС системы с разнесенными в пространстве и времени различного рода источниками техногенной опасности и их дестабилизирующем влиянии на условия безопасности жизнедеятельности.

Поскольку условия нормального функционирования ПТС системы определяются балансом энергий природного и техногенного происхождения, необходимым для обеспечения жизнедеятельности на всех жизненных уровнях системы [1-3], то для оценки степени опасности жизнедеятельности ПТС системы в условиях функционирования на её территории различного рода **потенциально опасных объектов (ПОО)** предлагается использовать интегральный – энергетический показатель жизнедеятельности в условиях **чрезвычайных ситуаций (ЧС)** техногенного происхождения.

Энергия техногенного происхождения ($E^{Tex.}$) является составляющей энергии различных видов топлив (E_T), которые потребляются регионами, и электрической энергии ($E_э$).

Излагаемый ниже подход справедлив для любого государства. Для определенности в качестве примера приводятся расчёты для Украины.

Уровни потребления регионами Украины различных видов топлив пересчитаны по истинным значениям их масс в условные значения с учётом того, что теплота сгорания за $29,3 \text{ МДж/кг} \approx 7000 \text{ ккал/кг}$.

Как показали расчёты, с использованием данных [3], ежегодно каждым регионом Украины используется приблизительно $10^5 - 10^7$ тонн условного топлива, что обеспечивает уровень энергии $E_T \approx 10^{16} - 10^{18}$ Дж.

Из анализа количества электрической энергии ($E_э$), потребленной регионами Украины (по данным [4]) следует, что ежегодно каждый регион имеет в своём распоряжении электроэнергию в количестве приблизительно $2 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^{10}$ кВт·ч.

Оценить социальные условия жизнедеятельности регионов возможно путем анализа взаимосвязи между объёмами потребления регионами энергии техногенного происхождения ($E^{Tex.} = E_T + E_э$) и численностью проживающего населения. Распределение среднесуточной энергии $\bar{E}^{Tex.} = E^{Tex.}/365$, как интегрального показателя уровня жизни, и количества населения ($N^{Насел.}$) по регионам Украины представлено на рис. 1.

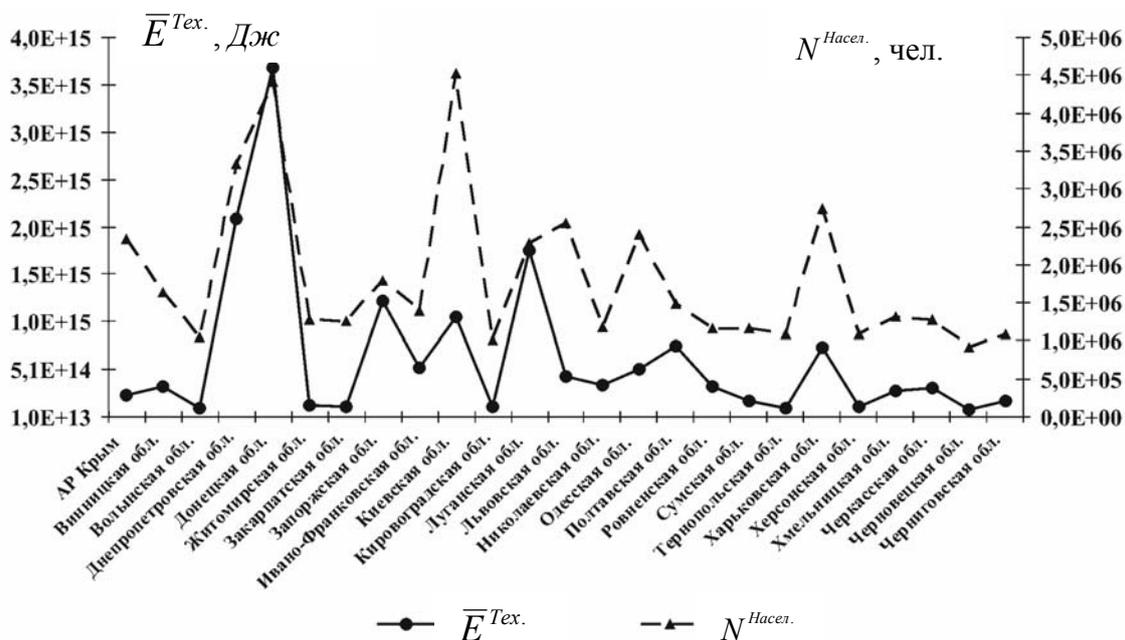


Рис. 1. Распределение среднесуточной энергии техногенного происхождения ($\bar{E}^{Tex.}$) и численностью населения ($N^{Насел.}$) по регионам Украины

Как видно из рис. 1, наиболее заселенными являются Киевская обл. ($N^{Насел.} \approx 4,5 \cdot 10^6$ чел.) и Донецкая обл. ($N^{Насел.} \approx 4,4 \cdot 10^6$ чел.). Кроме того, значительно заселенными являются Днепропетровская ($N^{Насел.} \approx 3,3 \cdot 10^6$ чел.), Харьковская ($N^{Насел.} \approx 2,7 \cdot 10^6$ чел.) и Львовская ($N^{Насел.} \approx 2,5 \cdot 10^6$ чел.) области. Наименее заселенной является Черновицкая обл. ($N^{Насел.} \approx 0,9 \cdot 10^6$ чел.).

Для оценки взаимосвязи между показателями $\bar{E}^{Tex.}$ и $N^{Насел.}$ коэффициент корреляции представлен в виде [5]:

$$r_{\bar{E}^{Tex.} N^{Насел.}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i^{Tex.} - \bar{E}^{Tex.*}) (N_i^{Насел.} - N^{Насел.*})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i^{Tex.} - \bar{E}^{Tex.*})^2 \sum_{i=1}^n (N_i^{Насел.} - N^{Насел.*})^2}}, \quad (1)$$

где $\bar{E}^{Tex.*}$ и $N^{Насел.*}$ – среднее значение по территории Украины показателей $\bar{E}^{Tex.}$ и $N^{Насел.}$;

$n = 25$ – количество регионов Украины.

Представленная на рис. 1 динамика показателей $\bar{E}^{Tex.}$ и $N^{Насел.}$ характеризуется коэффициентом корреляции $r_{\bar{E}^{Tex.} N^{Насел.}} \approx 0,77$.

Проверка значимости коэффициентов корреляции проведена на соответствие с вычисленным показателем:

$$T_{Набл.} = r_{\bar{E}^{Tex.} N^{Насел.}} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{\bar{E}^{Tex.} N^{Насел.}}^2}}. \quad (2)$$

Критическая точка распределения Стьюдента ($t_{кр}(\alpha; k)$), определённая по заданному уровню значимости $\alpha = 0,05$ и числу степеней свободы $k = n - 2 = 23$, имеет значение $\approx 2,07$.

Полученные результаты расчётов $T_{Набл.} \approx 5,79$ свидетельствуют о возможности отбросить нулевую гипотезу ($|T_{Набл.}| > t_{кр}(\alpha; k)$) и констатировать наличие устойчивой корреляции между объёмами потребления регионами Украины энергии техногенного происхождения и количеством населения.

Противоположной составляющей жизнедеятельности ПТС системы является наличие в системе результата человеческой деятельности – различного рода ПОО, дестабилизирующих безопасное состояние ПТС системы.

Среди широкого спектра разнесённых по территории Украины ПОО, по данным [6], фактическую опасность для нормального функционирования ПТС системы составляют 14 562 ПОО – промышленные предприятия, шахты, карьеры, магистральные газо-, нефте- и продуктопроводы, гидротехнические сооружения, узловые железнодорожные станции, мосты, туннели, полигоны промышленных отходов, места хранения опасных химических веществ и т.д.

Распределение по регионам Украины общего количества ПОО ($K_{ПОО}$), в соответствии с данными [6], и среднесуточного потребления ими объёма энергии – $\bar{E}^{Tex.}$, как интегрального показателя уровня жизнедеятельности, представлено на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что наиболее потребляющим энергию регионом является Донецкая обл. ($\bar{E}^{Tex.} \approx 3,69 \cdot 10^{15}$ Дж), при этом количество в данном регионе ПОО является весьма высоким: $K_{ПОО} = 1232$. Регионом, потребляющим наименьшее количество техногенной энергии, является Черновицкая обл.

($\bar{E}^{Tex.} \approx 8,28 \cdot 10^{13}$ Дж), в которой находится наименьшее количество ПОО – 227. Днепропетровская ($\bar{E}^{Tex.} \approx 2,10 \cdot 10^{15}$ Дж; $K_{ПОО} = 904$), Луганская ($\bar{E}^{Tex.} \approx 1,76 \cdot 10^{15}$ Дж; $K_{ПОО} = 682$) и Запорожская ($\bar{E}^{Tex.} \approx 1,22 \cdot 10^{15}$ Дж; $K_{ПОО} = 884$) области также относятся к регионам с относительно высоким уровнем потребления техногенной энергии и содержанием большого количества ПОО.

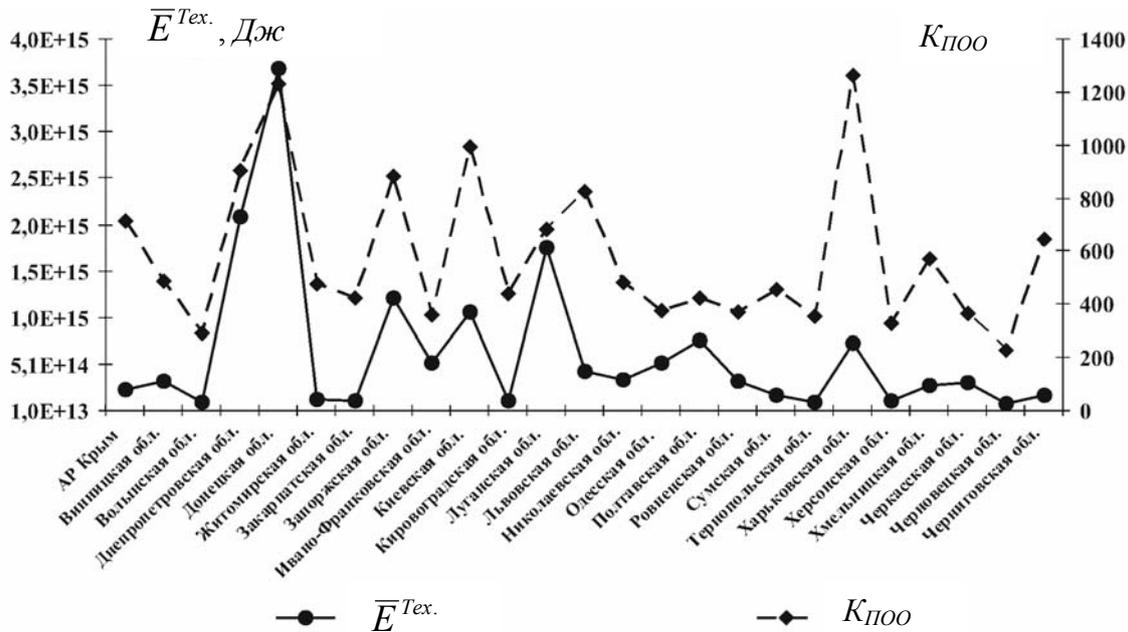


Рис. 2. Распределение среднесуточной энергии техногенного происхождения ($\bar{E}^{Tex.}$) и количества потенциально-опасных объектов ($K_{ПОО}$) по регионам Украины

Интерес представляет Харьковский ($\bar{E}^{Tex.} \approx 7,38 \cdot 10^{14}$ Дж; $K_{ПОО} = 1264$), Львовский ($\bar{E}^{Tex.} \approx 4,38 \cdot 10^{14}$ Дж; $K_{ПОО} = 823$) и Киевский ($\bar{E}^{Tex.} \approx 1,06 \cdot 10^{15}$ Дж; $K_{ПОО} = 995$) регионы, в которых количество ПОО существенно превышает количество ПОО в регионах, имеющих аналогичное энергопотребление. Это может быть обусловлено либо отсутствием в этих регионах энергоёмких объектов, либо функционированием энергоёмких объектов не на полную мощность. И, тем не менее, в соответствии с (1), результаты корреляционного анализа данных рис. 2 свидетельствуют о том, что между показателями $\bar{E}^{Tex.}$ и $K_{ПОО}$ наблюдается устойчивая корреляция на уровне $r_{\bar{E}^{Tex.}, K_{ПОО}} \approx 0,70$.

Взаимосвязь между территориальным распределением по Украине среднесуточной энергии техногенного происхождения ($\bar{E}^{Tex.}$) и численностью населения ($N^{Насел.}$), а также взаимосвязь между $\bar{E}^{Tex.}$ и количеством ПОО позволяет констатировать существование в Украине нескольких энергетических уровней (рис. 3), обеспечивающих жизнедеятельность регионов Украины.

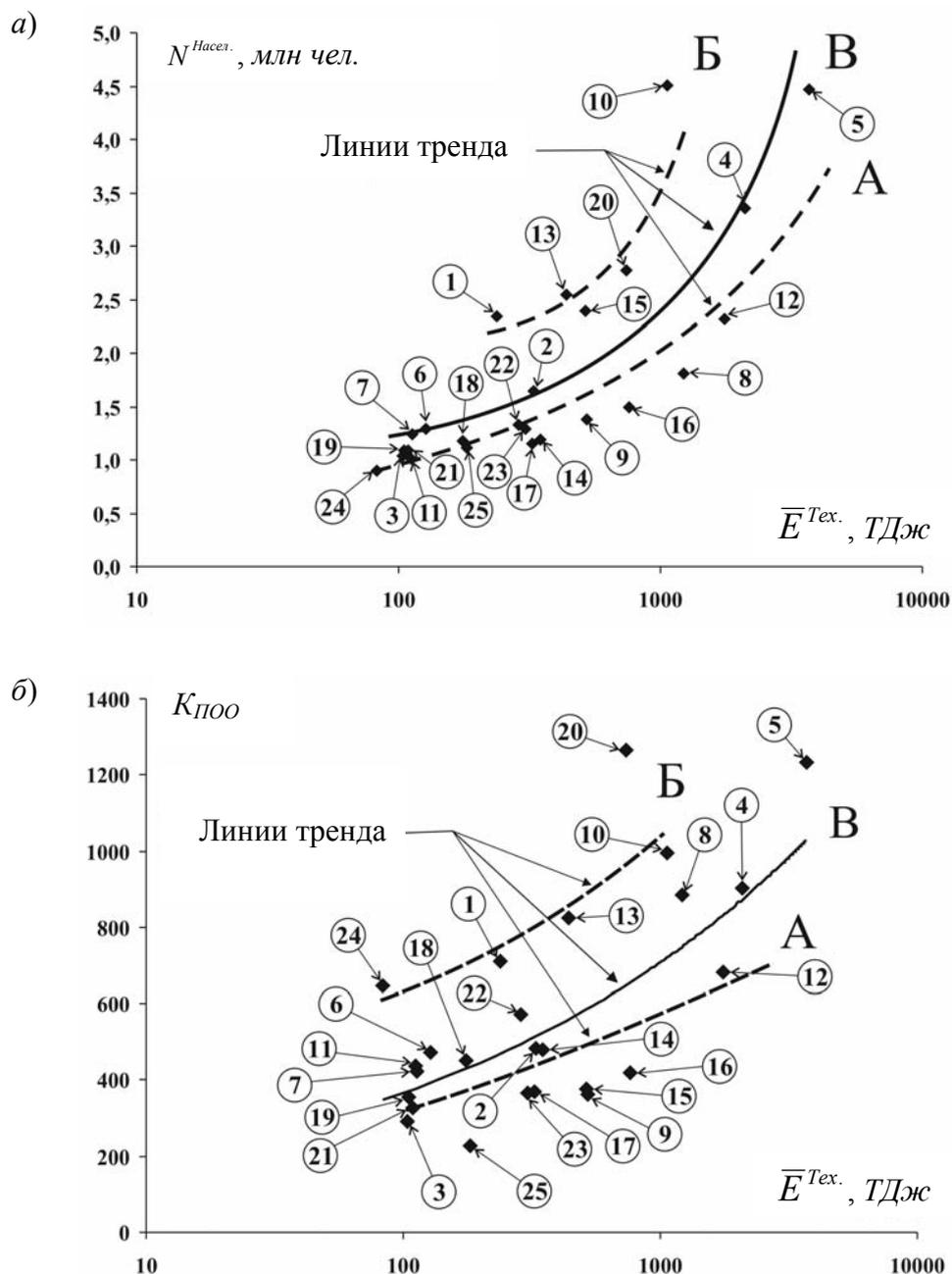


Рис. 3. Графические зависимости между количеством населения ($N^{Насел.}$) – рис. 4а и количеством ПОО ($K_{ПОО}$) – рис. 4б и среднесуточной энергией

техногенного происхождения ($\bar{E}^{Тех.}$) в регионах Украины:

- 1 – АР Крым; 2 – Винницкая обл.; 3 – Волынская обл.; 4 – Днепропетровская обл.; 5 – Донецкая обл.; 6 – Житомирская обл.; 7 – Закарпатская обл.; 8 – Запорожская обл.; 9 – Ивано-Франковская обл.; 10 – Киевская обл.; 11 – Кировоградская обл.; 12 – Луганская обл.; 13 – Львовская обл.; 14 – Николаевская обл.; 15 – Одесская обл.; 16 – Полтавская обл.; 17 – Ровенская обл.; 18 – Сумская обл.; 19 – Тернопольская обл.; 20 – Харьковская обл.; 21 – Херсонская обл.; 22 – Хмельницкая обл.; 23 – Черкасская обл.; 24 – Черновицкая обл.; 25 – Черниговская обл.

Распределение по линии А характеризуется регионами со сравнительно невысокой численностью населения $N^{Насел.}$ и количеством $K_{ПОО}$, а также малым показателем потребления энергии $\bar{E}^{Тех.}$. По данному варианту функционирует преобладающее большинство регионов. Исключение составляют некоторые регионы, условия жизнедеятельности в которых соответствуют второму варианту по линии Б.

По линии тренда Б энергетические затраты на население и функционирование ПОО значительно выше. Однако в этой серии присутствует небольшое количество регионов.

Так, в соответствии с динамикой социально-энергетических ($N^{Насел.} - \bar{E}^{Тех.}$) показателей по второму варианту (линия Б, рис. 3а) функционируют Киевская ($N^{Насел.} \approx 4,51$ млн чел., $\bar{E}^{Тех.} \approx 1061$ ТДж), Харьковская ($N^{Насел.} \approx 2,77$ млн чел., $\bar{E}^{Тех.} \approx 738$ ТДж), Одесская ($N^{Насел.} \approx 2,39$ млн чел., $\bar{E}^{Тех.} \approx 518$ ТДж), Львовская ($N^{Насел.} \approx 2,55$ млн чел., $\bar{E}^{Тех.} \approx 438$ ТДж) области и АР Крым ($N^{Насел.} \approx 2,35$ млн чел., $\bar{E}^{Тех.} \approx 238$ ТДж).

В соответствии с динамикой промышленно-энергетических ($K_{ПОО} - \bar{E}^{Тех.}$) показателей по второму варианту (линия Б, рис. 3б) функционируют Харьковская ($K_{ПОО} = 1264$, $\bar{E}^{Тех.} \approx 738$ ТДж), Киевская ($K_{ПОО} = 995$, $\bar{E}^{Тех.} \approx 1061$ ТДж), Львовская ($K_{ПОО} = 823$ объекта, $\bar{E}^{Тех.} \approx 438$ ТДж) области и АР Крым ($K_{ПОО} = 711$, $\bar{E}^{Тех.} \approx 238$ ТДж).

Варианты по трендам В включают массивы, по которым строились линии А и Б.

Аппроксимация всех линий тренда реализована на интервале $\bar{E}^{Тех.} \approx 80 - 3700$ ТДж в виде степенных функций. Так, аппроксимация изменения $N^{Насел.} - \bar{E}^{Тех.}$ показателей жизнедеятельности регионов Украины, в соответствии с линиями А, Б и В на рис. 3а, имеет вид:

$$N^{Насел.} = 0,22(\bar{E}^{Тех.})^{0,33} - \text{линия А}, \quad (3)$$

$$N^{Насел.} = 0,25(\bar{E}^{Тех.})^{0,39} - \text{линия Б}, \quad (4)$$

$$N^{Насел.} = 0,19(\bar{E}^{Тех.})^{0,37} - \text{линия В}, \quad (5)$$

где $\bar{E}^{Тех.}$ – в ТДж (1 ТДж = 10^{12} Дж); $N^{Насел.}$ – в млн чел.

Достоверность аппроксимации зависимости $N^{Насел.} = \varphi(\bar{E}^{Тех.})$ регрессионными уравнениями (3)-(5) определена через коэффициент детерминации (R^2), который определяет долю разброса, учитываемого регрессией, в общем разбросе результативного признака, как в [5]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{N}_i^{Насел.} - N^{Насел.*})^2}{\sum_{i=1}^n (N_i^{Насел.} - N^{Насел.*})^2}, \quad (6)$$

где $N^{Насел.*}$ – среднее значение $N_i^{Насел.}$ ($i = 1, \dots, n$);

$\hat{N}_i^{Насел.}$ – выровненное значение показателя $N_i^{Насел.}$;

n – количество регионов Украины.

Расчёты по соотношению (6) показали, что значения коэффициентов детерминации для линий тренда, представленных на рис. 3а, равны: $R^2 \approx 0,83$ (линия А); $R^2 \approx 0,65$ (линия Б); $R^2 \approx 0,69$ (линия В).

Аппроксимация изменения промышленно-энергетических ($K_{\text{ПОО}} - \bar{E}^{\text{Tex.}}$) показателей жизнедеятельности регионов Украины, в соответствии с линиями А, Б и В на рис. 3б, имеет вид:

$$K_{\text{ПОО}} = 84,91(\bar{E}^{\text{Tex.}})^{0,29} - \text{линия А}, \quad (7)$$

$$K_{\text{ПОО}} = 223,02(\bar{E}^{\text{Tex.}})^{0,23} - \text{линия Б}, \quad (8)$$

$$K_{\text{ПОО}} = 98,19(\bar{E}^{\text{Tex.}})^{0,29} - \text{линия В}. \quad (9)$$

Достоверность аппроксимации зависимости $K_{\text{ПОО}}^{\text{Хим.}} = \mu(\bar{E}^{\text{Tex.}})$ регрессионными уравнениями (7)-(9), определена через расчёт коэффициентов R^2 , в соответствии с выражением (6). Значения коэффициентов детерминации равны: $R^2 \approx 0,61$ (линия А); $R^2 \approx 0,73$ (линия Б); $R^2 \approx 0,44$ (линия В).

Неравномерность (двухуровневое распределение функций $N^{\text{Насел.}} - \bar{E}^{\text{Tex.}}$ и $K_{\text{ПОО}} - \bar{E}^{\text{Tex.}}$) распределения потребления энергии населением и функционирования ПОО приводит к необходимости проведения также двухуровневой оценки степени риска ПТС системы Украины.

Анализ уровня среднесуточного техногенного риска $\bar{R}^{\text{Tex.}}$ территории Украины, с учётом её внутренних особенностей, описываемых зависимостями $N^{\text{Насел.}} - \bar{E}^{\text{Tex.}}$ и $K_{\text{ПОО}} - \bar{E}^{\text{Tex.}}$, проведём в соответствии с подходом:

$$\bar{R}^{\text{Tex.}} = \bar{F}^{\text{Tex.}} U^{\text{ПУ}}, \quad (10)$$

где $\bar{F}^{\text{Tex.}} = K_{\text{ЧС}}^{\text{Tex.}} / 365$ – среднесуточная частота возникновения ЧС техногенного характера, дестабилизирующих ПТС систему;

$K_{\text{ЧС}}^{\text{Tex.}}$ – годовое количество ЧС техногенного характера;

$U^{\text{ПУ}}$ – прямой (в условиях непосредственного влияния опасных факторов) ущерб ПТС системы [1].

Оценка степени техногенного риска территории Украины проведена нами в рамках оценки величины вероятностного риска, обусловленного среднесуточной частотой возникновения ЧС техногенного характера. Статистическая информация о количестве ЧС техногенного характера обработана по данным, приведённым в [7] за период 2002-2011 гг. На основе этих данных рассчитаны величины среднесуточной частоты возникновения ЧС техногенного характера $\bar{F}^{\text{Tex.}}$ по регионам Украины. Результаты сопоставления динамики показателей $\bar{F}^{\text{Tex.}}$ и $K_{\text{ПОО}}$ представлены на рис. 4.

Результаты корреляционного анализа данных рис. 4, свидетельствуют о том, что между показателями $\bar{F}^{\text{Tex.}}$ и $K_{\text{ПОО}}$ наблюдается устойчивая корреляция на уровне $r_{\bar{F}^{\text{Tex.}} \cdot K_{\text{ПОО}}} \approx 0,74$. Это позволяет констатировать наличие взаимосвязи между данными показателями в виде, представленном на рис. 5.

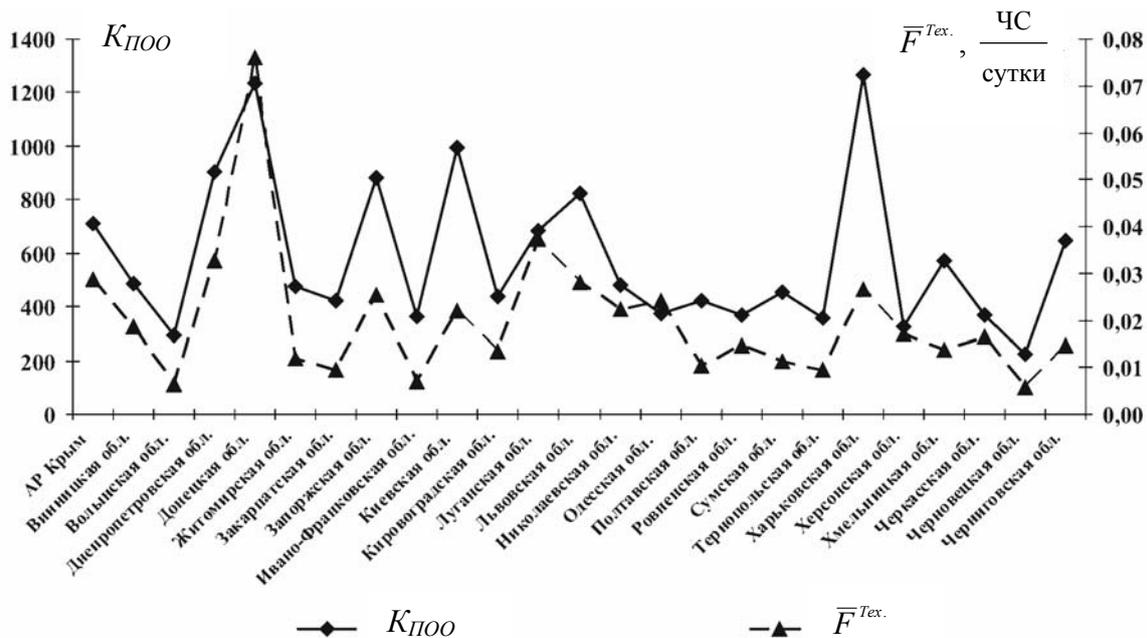


Рис. 4. Распределение количества потенциально опасных объектов ($K_{\Pi OO}$) и среднесуточной частоты возникновения ЧС техногенного характера (\bar{F}^{Tex}) по регионам Украины

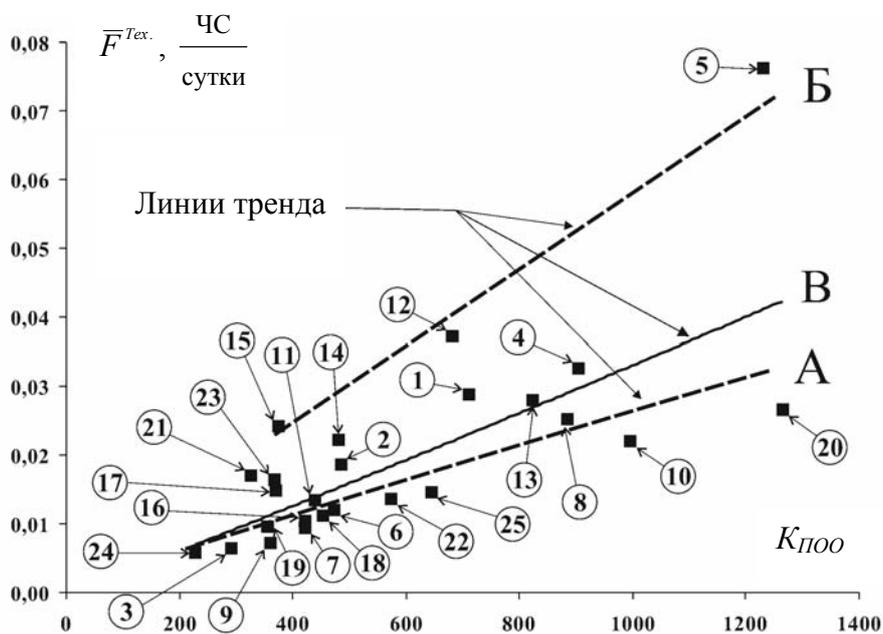


Рис. 5. Графическая зависимость между количеством потенциально-опасных объектов ($K_{\Pi OO}$) и среднесуточной частотой возникновения ЧС техногенного характера (\bar{F}^{Tex}) (нумерация областей наведена в соответствии с рис. 4)

Так, приведённая на рис. 5 графическая зависимость между количеством потенциально опасных объектов и среднегодовым количеством ЧС техногенного характера свидетельствует, что существует несколько сценариев (вариантов) техногенной опасности в Украине.

Первый вариант (линия А, рис. 5) характеризуется установившейся для большинства регионов Украины зависимостью между $K_{\text{ПОО}}$ и $\bar{F}^{\text{Tex.}}$. Исключение составляют некоторые регионы, в которых соотношение $K_{\text{ПОО}} - \bar{F}^{\text{Tex.}}$ подчиняется второму варианту (линия Б, рис. 5). По этому сценарию функционируют Донецкая, Луганская и Одесская области.

Вариант В объединяет массивы, по которым строились линии А и Б.

Линии тренда между показателями $\bar{F}^{\text{Tex.}}$ и $K_{\text{ПОО}}$ аппроксимированы на интервале $K_{\text{ПОО}} = 227-1264$ степенными функциями в виде:

$$\bar{F}^{\text{Tex.}} = 4 \cdot 10^{-5} (K_{\text{ПОО}})^{0,93} - \text{линия А,} \quad (11)$$

$$\bar{F}^{\text{Tex.}} = 7 \cdot 10^{-5} (K_{\text{ПОО}})^{0,97} - \text{линия Б,} \quad (12)$$

$$\bar{F}^{\text{Tex.}} = 2 \cdot 10^{-5} (K_{\text{ПОО}})^{1,06} - \text{линия В.} \quad (13)$$

Достоверность аппроксимации зависимости $\bar{F}^{\text{Tex.}} = \xi(K_{\text{ПОО}})$ регрессионными уравнениями (11)-(13) определена значениями коэффициентов детерминации R^2 , в соответствии с подходом в выражении (6). Значения коэффициентов детерминации: $R^2 \approx 0,67$ (линия А); $R^2 \approx 0,98$ (линия Б); $R^2 \approx 0,64$ (линия В).

В заключение необходимо отметить, что общая методология оценки техногенной опасности, которая представлена в статье является универсальной при решении задачи обеспечения соответствующего уровня техногенной безопасности в стране.

Выводы

1. Показана возможность использования энергетического подхода для оценки уровня опасности жизнедеятельности заданной территории (страны) в условиях функционирования потенциально опасных объектов и возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

2. На основе рассмотрения характера изменения энергетических параметров функционирования потенциально опасных объектов и их негативного влияния на социальную составляющую природно-техногенно-социальной системы разработан подход к оценке техногенной опасности заданной территории (страны).

3. Получены регрессионные зависимости между характерными для территории страны (в данном случае Украины) показателями: среднесуточной энергии техногенного происхождения, численностью проживающего населения, количеством потенциально опасных объектов и среднесуточной частотой возникновения ЧС техногенного характера.

4. Предложенный подход к оценке техногенной опасности заданной территории (страны) и полученные примеры новых аналитических выражений (регрессионных уравнений) являются основой для проведения дальнейших исследований, направленных на разработку эффективной комплексной системы мониторинга и противодействия ЧС природного и техногенного характера в любой стране.

Литература

1. *Тютюник В.В., Черногор Л.Ф., Калугін В.Д.* Системний підхід до оцінки небезпеки життєдіяльності при територіально-часовому розподілі енергії джерел надзвичайних ситуацій // Проблеми надзвичайних ситуацій. Х.: НУЦЗУ, 2011. Вип. 14. С. 171-194.

2. *Калугін В.Д., Тютюник В.В., Черногор Л.Ф., Шевченко Р.І.* Системний підхід до оцінки ризиків надзвичайних ситуацій в Україні // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. 1/6 (55). С. 59-70.

3. *Тронин А.А.* Энергетический подход к оценки уровня экологической безопасности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 9-17.

4. *Паливно-енергетичні* ресурси України: Статистичний збірник. К.: Державний комітет статистики України, 2009. 443 с.

5. *Кибзун А.И., Горяинова Е.Р., Наумов А.В., Сиротин А.Н.* Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 224 с.

6. *Національна* доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2007 році. <http://www.menr.gov.ua/index.php/dopovidi/nacdopovidi>.

7. *Національна* доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні. <http://www.mns.gov.ua>.